

پیش‌نگری شدت بارش در ایران با به‌کارگیری رویکرد همادی چندمدلی با استفاده از داده‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP

آذر زرین^{۱*} و عباسعلی داداشی رودباری^۲

^۱ دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
^۲ پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷)

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی کارایی مدل‌های مقیاس‌گاهی شده روزانه جهانی تبادل زمین ناسا (NEX-GDDP) در شبیه‌سازی شدت بارش و پیش‌نگری بلندمدت آن در ایران است. برای این منظور، مدل از مدل‌های CMIP5 از پروژه NEX-GDDP بر اساس حساسیت اقلیمی گزینش شد. برای درستی‌سنجی برون‌داد بارش داده‌های مذکور از داده‌های بارش ۴۹ ایستگاه هم‌دیدگی طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) و دو سنجه آماری RMSE و MBE استفاده شد. نتایج نشان داد داده‌های پروژه NEX-GDDP در مقایسه با داده‌های مشاهداتی آریبی چندانی ندارند و بیشتر مدل‌ها با خطای نسبی کم، کارایی لازم را در بازتولید الگوی فضایی بارش در ایران دارند. از بین مدل‌های نه‌گانه بررسی‌شده، مدل MPI-ESM-LR بیشینه بیش‌برآوردی و مدل IPSL-CM5A-LR بیشینه کم‌برآوردی را در ایران نشان می‌دهد. در مقایسه با سایر GCM ها در دوره تاریخی، داده‌های پروژه NEX-GDDP عدم قطعیت کمتری را در مقیاس منطقه‌ای نشان می‌دهند و از این‌رو پیش‌نگری‌های NEX-GDDP بسیار مطمئن‌تر است. از روش میانگین‌گیری مدل بیزی (BMA) جهت تولید یک مدل همادی از مدل‌های نه‌گانه استفاده شد. بر اساس مساحت زیر خم ROC، مدل همادی تولیدشده کارایی بهتری را نسبت به مدل‌های منفرد نشان داد. پیش‌نگری شدت بارش با دو شاخص SDII و RX1day با مدل همادی NEX-GDDP-MME طی سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انجام شد. پیش‌نگری‌های شدت بارش نشان می‌دهد در آینده در سراسر ایران بارش با شدت بیشتری اتفاق می‌افتد. شاخص‌های SDII و RX1day تا پایان قرن در حدود ۴ تا ۱۳ درصد برای متوسط پهنه ایران افزایش خواهند یافت که نشان‌دهنده افزایش بارش‌های سیل‌آسا طی دهه‌های آینده در ایران است.

واژه‌های کلیدی: شدت بارش، تغییر اقلیم، روش BMA، NEX-GDDP، ایران

۱ مقدمه

گرمایش جهانی تأثیر چشمگیری بر تغییرات شرایط جوئی و اقلیمی دارد. این تغییرات و به خصوص تغییر در فرین های اقلیمی تأثیر زیادی بر جامعه بشری و بوم سازگان دارد. تغییرات آینده در رخدادهای فرین اقلیمی، از جمله فرین های بارشی، به دلیل پیامدهای بالقوه شدیدی که دارند، به خسارات زیادی برای جامعه، اقتصاد و بوم سازگان منجر خواهند شد. هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC) در گزارش هایش (آی پی سی سی، ۲۰۱۳) تأکید کرده است رخدادهای فرین اقلیمی در آینده در سطح جهانی و منطقه ای بیشتر خواهند شد (فیلد و لارند-میلر، ۲۰۱۲)؛ لذا ضروری است تغییرات آنها بررسی و پیش نگرایی های معتبری از آینده برای برنامه های سازگاری با تغییر اقلیم ارائه شود.

مطالعات متعددی افزایش بارش های فرین را در سراسر جهان گزارش داده اند (وسترا و همکاران، ۲۰۱۳؛ دونات و همکاران، ۲۰۱۶؛ آکینسانولا و همکاران، ۲۰۲۱؛ سان و همکاران، ۲۰۲۱ و کلوتسه و همکاران، ۲۰۲۱). پیش نگرایی های بارش فرین در حال حاضر جهت بررسی احتمال این بارش ها در آینده مهم است. با این حال به دلیل ماهیت پیچیده سامانه اقلیم زمین، این پیش نگرایی ها با عدم قطعیت همراه هستند. این موضوع سبب می شود مدل های اقلیم منطقه ای / جهانی نتوانند به خوبی در آشکارسازی این تغییرات نقش آفرینی کنند (ژو و چن، ۲۰۱۵). شرایط اقلیمی گرم تر، ظرفیت جو را برای نگهداری بخار آب افزایش می دهد. در این حالت واداشت های لازم برای تکوین بارش های فرین افزایش می یابند (آلن و سدن، ۲۰۰۸). گزارش ها نشان می دهد در دهه اخیر با وجود کاهش بارش سالانه، رخدادهای فرین بارشی در بسیاری از مناطق جهان به میزان چشمگیری افزایش یافته اند (سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۱۱ و راثو و همکاران، ۲۰۲۰). در همین راستا بارش های سنگین و سیل آسا در

ایران نیز همانند سیل های سراسری نوروز ۱۳۹۸ و سیل ۱۳۹۹ جنوب ایران افزایش داشته است. از این رو ضرورت دارد در گام نخست جهت برنامه های سازگاری با تغییر اقلیم نسبت به بررسی تغییرات فرین های بارشی و سپس به پیش نگرایی آنها پرداخته شود.

همان طور که گفته شد، پیش نگرایی های اقلیمی به دلیل ماهیت پیچیده سامانه اقلیم، عدم قطعیت زیادی دارند که همین موضوع درک درستی را از واقعیت سامانه اقلیم و درستی مدل سازی آن (ژو و چن، ۲۰۱۵) به ویژه در سطوح منطقه ای و مناطقی با اقلیم های متنوع همچون ایران فراهم نمی کند. یک روش برای کاستن از عدم قطعیت مدل های اقلیمی، مقیاس گاهی (downscaling) آنهاست. مقیاس گاهی روشی است که با کمک آن می توان از داده های جهانی با تفکیک افقی پایین، داده هایی با تفکیک افقی بالاتر در سطح منطقه یا یک یا چند نقطه (ایستگاه) فراهم آورد.

روش های مقیاس گاهی مختلفی، از جمله رویکردهای دینامیکی و آماری، برای مدل های اقلیمی توسعه داده شده اند و برای پیش نگرایی ها استفاده می شوند. به دلیل سطح بالای دانش فنی و هزینه محاسباتی زیادی که برای مقیاس گاهی دینامیکی و اجرای RCM ها تحمیل می شود، شناخت صحیح شرایط اقلیمی آینده دشوار است. در مقایسه با روش مقیاس گاهی دینامیکی، مقیاس گاهی آماری به هزینه محاسباتی به نسبت کمتری نیاز دارد و این روش را به راحتی می توان در هر سیستم عامل و رایانه ای اجرا کرد (فاولر و همکاران، ۲۰۰۷)؛ از این رو در دهه های اخیر، رویکرد مقیاس گاهی آماری به طور گسترده ای در پیش نگرایی های اقلیمی در سراسر جهان (اشمیدلی و همکاران، ۲۰۰۶ و ساچیندرا و همکاران، ۲۰۱۸) و همچنین ایران (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹ و فلاح قالیپوری و همکاران، ۲۰۱۹) استفاده شده است. یکی از روش های

در سطح جهانی وجود دارد، در این پژوهش نیز از شاخص‌های استاندارد ETCCDI برای بررسی فرین‌های بارشی استفاده شده است.

از ارائه داده‌های مقیاس کاهی شده پروژه NEX-GDDP چند سالی بیشتر نمی‌گذرد؛ با این حال پژوهش‌های بسیاری به بررسی آن در مقیاس‌های مکانی مختلف پرداخته‌اند و کارایی آن را تأیید کرده‌اند. بررسی‌های انجام‌شده با این داده‌ها برای تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت پیش‌نگری‌های بارش و دما در سطح جهانی (بائو و ون، ۲۰۱۷؛ راگوان و همکاران، ۲۰۱۸؛ سینگ و همکاران، ۲۰۱۹ و داس و همکاران، ۲۰۲۱) و جنوب غربی ایران (زیدعلی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱)، نشان از دقت زیاد این مجموعه داده برای بارش و دما داشته است. پژوهش‌های متعددی نیز از داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP برای پایش و پیش‌نگری فرین‌های بارشی استفاده کرده‌اند. چن و همکاران (۲۰۱۷) تغییرات آینده بارش‌های فرین در چین را با استفاده از مجموعه داده‌های مقیاس کاهی شده روزانه NEX-GDDP بررسی کردند. نتایج آن پژوهش نشان داد در آینده، فرین‌های بارشی در سراسر چین افزایش می‌یابند. بررسی تغییرات آبی فرین‌های بارشی طی دوره موسمی در شمال شرقی هند، پژوهشی است که رائو و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس پروژه NEX-GDDP انجام دادند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد شدت و فراوانی فرین‌های بارشی در بیشتر مناطق شبه‌جزیره جنوبی هند در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در طول فصل موسمی افزایش می‌یابد. ژائو و همکاران (۲۰۲۰) تغییرات فرین‌های دما و بارش را در مناطق خشک و نیمه‌خشک چین بر مبنای رویکرد چند مدلی در دوره تاریخی و پیش‌نگری‌شده آینده بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP5 مقیاس کاهی شده پروژه NEX-GDDP بررسی کردند. نتایج نشان داد فرین‌های بارشی و شاخص‌های SDII و RX1day روند افزایشی داشتند. داس و همکاران (۲۰۲۱)

مقیاس کاهی آماری را سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا موسوم به ناسا (NASA) برای مدل‌های گردش کلی (GCM) از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز پنجم (CMIP5) اعمال و مجموعه داده‌هایی با تفکیک افقی بالا برای پیش‌نگری‌های بلندمدت ایجاد کرد. این مجموعه داده به نام پیش‌نگری‌های مقیاس کاهی شده روزانه جهانی تبادل زمین ناسا (NEX-GDDP) معرفی و در ژوئن ۲۰۱۵ منتشر شد (تراشر و همکاران، ۲۰۱۳).

فرین‌های بارشی که یکی از مهم‌ترین عرصه‌های تحقیقاتی در اقلیم‌شناسی، هواشناسی و علوم مرتبط با منابع آب هستند، همواره مورد توجه بوده‌اند و در سال‌های گذشته، روش‌های مختلفی برای شناخت آنها توسعه داده شده است. به‌طور کلی، دو روش برای تعریف و تحلیل فرین‌های اقلیمی ارائه شده است (سنویراتنه و همکاران، ۲۰۱۲). رویکرد نخست، استفاده از شاخص‌های فرین اقلیمی است که کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌ها (ETCCDI) ارائه کرده است (تانگ و همکاران، ۲۰۰۹ و ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱). شاخص‌های ETCCDI رخدادهای فرین اقلیمی را در یک سال یا ماه معین نشان می‌دهند. بنابراین به دلیل استاندارد بودن این شاخص‌ها از مقبولیت زیادی برخوردار هستند (خارین و همکاران، ۲۰۱۳). روش دیگر برای تحلیل فرین‌های اقلیمی، به کارگیری نظریه مقادیر فرین (EVT) است. این رویکرد آماری معمولاً مبتنی بر تحلیل توزیع مقدار فرین تعمیم‌یافته (GEV) است که مقادیر فرین را در دوره‌های بازگشت مثلاً یک تا بیست ساله بررسی می‌کند. روش GEV می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای برنامه‌ریزی‌های طولانی‌مدت فراهم کند، اما چون از یک سو سازمان هواشناسی جهانی (WMO)، شاخص‌های ETCCDI را شاخص‌های استاندارد فرین معرفی کرده است و از سوی دیگر، توانایی مقایسه بهتر این شاخص‌ها

مختلف، به پایش و پیش‌نگری آن‌ها پرداخته‌اند، اما تاکنون پژوهشی انجام نشده است که با استفاده از داده‌های روزانه مقیاس کاهی شده NEX-GDDP آن‌ها را بررسی کند. شایان ذکر است داده‌های NEX-GDDP در برخی از مناطق ایران همچون جنوب غرب (زیدعلی‌نژاد و همکاران، ۲۰۲۱) و حوضه‌های آبخیزی همچون رودخانه تراز-هرکش (زیدعلی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸) استفاده شده و کارایی آن برای بارش و دما تأیید شده است. با این حال هنوز ماهیت تغییرات فرین‌های بارشی ایران با استفاده از این مجموعه داده، که تفکیک افقی بالاتری نیز دارد، مشخص نشده است.

هدف از این پژوهش، پیش‌نگری شدت بارش در ایران بر اساس داده‌های مقیاس کاهی شده روزانه NEX-GDDP است. بنابراین پژوهش در سه بخش اصلی سازماندهی شد: ۱- درستی‌سنجی داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP برای بارش در ایران؛ ۲- تولید مدل همادی روزانه با استفاده از برونداد داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP؛ ۳- پایش و پیش‌نگری شدت بارش در ایران تا پایان قرن حاضر. نتایج این تحقیق ضمن ارائه اطلاعات مفید درباره کارایی مدل‌های تغییر اقلیم و نقش مدل همادی در پیش‌نگری‌های اقلیمی، برای مدیریت منابع آب و سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم اهمیت ویژه‌ای دارد.

۲ داده و روش تحقیق

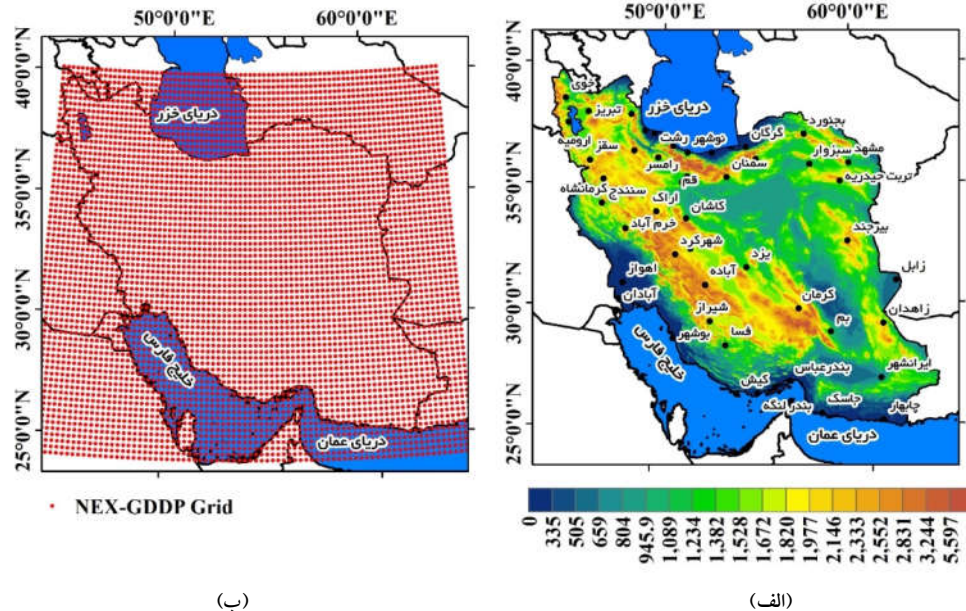
۲-۱ منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعه حاضر، کشور ایران است (شکل ۱). ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خود، در زمستان اقلیمی سرد و بارانی دارد و در تابستان گرم و خشک است. باین حال اختلاف ارتفاع زیاد بین دشت‌ها (برای مثال دشت خوزستان در جنوب غرب ایران) و مناطق کوهستانی مرتفع البرز و زاگرس، خرداقلیم‌های زیادی در دل اقلیم اغلب خشک و نیمه‌خشک ایران ایجاد کرده است. در نتیجه، ویژگی‌های اقلیمی ایران تا حدودی متفاوت از اقلیم معمول جنوب غرب آسیا است.

به بررسی تغییرات خشکسالی در هند بر اساس داده‌های نوزده مدل مقیاس کاهی شده با پروژه NEX-GDDP پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد شدت و فراوانی خشکسالی برای دوره‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت در بیشتر مناطق هند افزایش می‌یابد.

در ایران نیز بررسی فرین‌های بارشی در شرایط تغییر اقلیم، موضوع تحقیقاتی گسترده‌ای بوده و با استفاده از داده‌ها و روش‌های مختلفی تاکنون بررسی شده است. برای مثال واقفی و همکاران (۲۰۱۹) در مطالعه فرین‌های اقلیمی ایران در شرایط تغییر اقلیم بر اساس نتایج پنج مدل از سری مدل‌های CMIP5 به این نتیجه رسیدند که ایران در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۹ با افزایش احتمال سیلاب روبه‌رو خواهد شد. کتیرائی بروجردی و همکاران (۲۰۱۹) کارایی هفت مدل CMIP5 را برای فرین‌های بارشی با داده‌های ماهواره‌ای در ایران بررسی کردند و دریافتند مدل HadGEM2-ES بهترین کارایی را در شبیه‌سازی شدت بارش ایران دارد. پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برونداد همادی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6، پژوهشی است که زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) انجام داده‌اند. در این پژوهش پس از تولید یک مدل همادی، بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت در شرایط تغییر اقلیم در ایران بررسی و نشان داده شد این دوره‌ها در آینده روند افزایشی دارند. در پژوهشی دیگر، زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) به پیش‌نگری فرین‌های بارش آینده در ایران بر اساس روش همادی چند مدلی CMIP6 پرداختند. نتایج آن پژوهش نشان داد بیشینه بارش یک روزه و شدت بارش در ایران تا پایان قرن حاضر افزایشی است.

همان‌طور که از مرور منابع نیز مشخص است، در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی درباره فرین‌های بارشی انجام شده است که با استفاده از داده‌ها و روش‌های



شکل ۱. (الف) موقعیت ایستگاه‌های منتخب به همراه مدل رقومی ارتفاع (ب) شبکه‌های ۲۵ کیلومتری داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP.

کیلومتر) است (بائو و ون، ۲۰۱۷). این مجموعه داده با هدف ارائه پیش‌نگری‌های اقلیمی با تفکیک افقی بالا و رویکرد تصحیح اریبی برای بررسی اثر تغییر اقلیم در عرصه‌های مطالعاتی مختلف در مقیاس منطقه‌ای تا محلی تهیه شده است. مهم‌ترین ویژگی این سری از داده‌ها، در نظر گرفتن اثر توپوگرافی محلی بر شرایط اقلیم منطقه‌ای است (تریشر و همکاران، ۲۰۱۲ و بائو و ون، ۲۰۱۷).

روش استفاده شده برای مقیاس کاهی پروژه NEX-GDDP روشی آماری است. این روش، تفکیک فضایی تصحیح اریبی (BCSD) (Bias-Correction Spatial Disaggregation) نامیده می‌شود (تریشر و همکاران، ۲۰۱۲). روش مقیاس کاهی BCSD خروجی‌های GCM را با متغیرهای هواشناسی مشاهداتی در زمان مشابه با دوره تاریخی به کار می‌گیرد. روش یادشده پیش‌نگری‌های اقلیمی را به شکلی تصحیح می‌کند که با دوره مشاهداتی گذشته هماهنگ‌تر باشند. داده مشاهداتی استفاده شده در پروژه NEX-GDDP پایگاه داده واداشت هواشناسی جهانی (GMFD) (Global Meteorological Forcing)

۲-۲ ایستگاه‌های همدید ایران

جهت درستی‌سنجی برون‌داد بارش داده‌های مقیاس کاهی شده NEX-GDDP از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید استفاده شد. برای گزینش ایستگاه‌های همدید، به ایستگاه‌هایی با دوره آماری مشترک با دوره تاریخی مدل‌ها (۲۰۰۵-۱۹۸۰) در نظر گرفته شد. بر این اساس از ۴۹ ایستگاه همدید استفاده شد که در دوره آماری مذکور، داده در اختیار داشتند.

۳-۲ پیش‌نگری‌های مقیاس کاهی شده روزانه

جهانی تبادل زمین ناسا (NEX-GDDP)

مجموعه داده‌های پیش‌نگری مقیاس کاهی شده روزانه جهانی تبادل زمین ناسا (NEX-GDDP) شامل سه متغیر بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه برای دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۵۰) و پیش‌نگری شده (۲۰۰۶-۲۱۰۰) برای ۲۱ مدل گردش کلی جو (GCM) با سناریوهای واداشت تابشی حد واسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) است. تفکیک افقی این مدل‌ها ۰/۲۵ درجه قوسی (در حدود ۲۵

استقلال ساختاری مشابه داشته باشند (structural independence) و در نهایت آنکه بتوانند حساسیت اقلیمی را به وضوح نشان دهند (climate sensitivity) (لانگ، ۲۰۲۰). در بررسی اولیه مشخص شد کلیه ۲۱ مدل استفاده شده در پروژه NEX-GDDP، با وجود کارایی مناسبی که دارند، از نظر استقلال ساختاری و نمایش فرآیندهای اقلیمی اجزای مدل اقیانوسی و جوئی، مستقل هستند (سینگ و همکاران، ۲۰۱۹)؛ بنابراین در مرحله نخست، مدل‌هایی حذف شدند که از نظر فرآیندهای اقلیمی و ساختاری تفاوت داشتند و پس از آن، مدل‌ها به جهت حساسیت اقلیمی گزینش شدند. مدل‌های مقیاس‌کاهی شده منتخب در این پژوهش از نظر حساسیت اقلیمی شامل سه مدل با حساسیت اقلیمی کم (GFDL-ESM2M، MRI-ESM2-0 و MIROC-ESM)، چهار مدل با حساسیت اقلیمی زیاد (IPSL-CM5A-LR، ESM-LR، CNRM-CM5 و BCC-CSM1-1) و همچنین دو مدل با حساسیت اقلیمی حد واسط (CSIRO-Mk3-6-0 و CanESM2) هستند که جزئیات هر یک در جدول ۱ ارائه شده است.

۲۵ کیلومتر	rli1p1	آزمایشگاه دینامیک شاره- های ژئوفیزیکی، ایالات متحده آمریکا	GFDL-ESM2M
۲۵ کیلومتر	rli1p1	مؤسسه پیر سیمون لاپلاس، فرانسه	IPSL-CM5A-LR
۲۵ کیلومتر	rli1p1	مؤسسه ملی مطالعات محیط زیست، دانشگاه توکیو، ژاپن	MIROC-ESM
۲۵ کیلومتر	rli1p1	مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک، آلمان	MPI-ESM-LR
۲۵ کیلومتر	rli1p1	مؤسسه تحقیقات هواشناسی، ژاپن	MRI-CGCM3

۴-۲ مدل میانگین‌گیری بی‌زین (BMA)

مدل میانگین‌گیری بی‌زین (Bayesian Model Average,)

Dataset) است (شفلید و همکاران، ۲۰۰۶) که گروه تحقیقات هیدرولوژی دانشگاه پرینستون آن را ارائه کرده است.

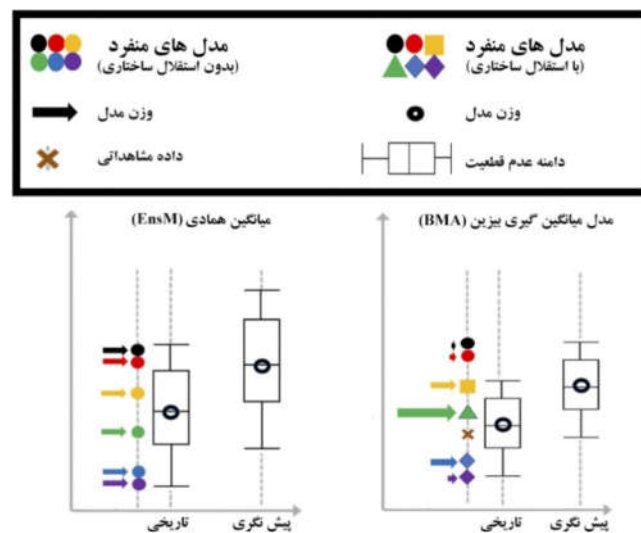
دوره تاریخی استفاده‌شده در این پژوهش، یک دوره ۲۵ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و دوره پیش‌نگری نیز سه دوره ۲۵ ساله آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) است. برای بررسی اثر تغییر اقلیم در شدت بارش ایران از برونداد نه مدل (جدول ۱) با دو سناریوی حد واسط (RCP4.5) و بدبینانه (RCP8.5) استفاده شد. علت استفاده از این دو سناریو در درجه نخست آن است که پروژه NEX-GDDP تنها با دو سناریوی حد واسط و بدبینانه اجرا شده است (بانو و ون، ۲۰۱۷). همچنین این دو سناریو برای تحقیق بیشتر در زمینه آسیب‌پذیری‌های ناشی از تغییر اقلیم و پاسخ‌های بعدی آن استفاده می‌شوند (مابنشاؤزن و همکاران، ۲۰۱۱) و واران‌تشیچ و رئی، ۲۰۱۹). لذا در این مطالعه نیز از همین دو سناریوی در دسترس پروژه NEX-GDDP استفاده شد. برای انتخاب مدل‌ها سه شرط بررسی شد. نخست آنکه مدل‌ها بتوانند به خوبی فرآیندهای اقلیم‌شناسی را نمایش دهند (process representation)؛ دوم آنکه مدل‌ها

جدول ۱. اطلاعات مدل‌های مورد مطالعه NEX-GDDP

تفکیک افقی (کیلومتر)	گونه اجرا	مؤسسه سازنده	نام
۲۵	rli1p1	مرکز اقلیمی پکن، اداره هواشناسی، چین	BCC-CSM1-1
۲۵	rli1p1	مرکز مدل‌سازی و تحلیل اقلیمی، کانادا	CanESM2
۲۵	rli1p1	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی، فرانسه	CNRM-CM5
۲۵	rli1p1	سازمان تحقیقات علمی و صنعتی مشترک‌المنافع با همکاری مرکز عالی تغییر اقلیم کوئینزلند، استرالیا	CSIRO-Mk3-6-0

حسابی (Ensm)، طرحی کلی از میانگین چند مدلی با استفاده از شش مدل فرضی (دایره‌ها، مربع، مثلث و لوزی-های شکل ۲) برای یک متغیر فرضی (در اینجا بارش) ارائه شده است. شبیه‌سازی هر مدل، با اشکال تک‌رنگ و میانگین مدل و عدم قطعیت آن به ترتیب با دایره توخالی و نمودار جعبه‌ای نشان داده شده است. شکل سمت چپ، میانگین چند مدلی همادی حسابی (Ensm) است. وزن یکسانی برای هر مدل اعمال می‌شود. شکل همه مدل‌ها یکسان است (دایره) و برای این رویکرد، جهت ایجاد یک مدل همادی، استقلال مدل در نظر گرفته نشده است. شکل سمت راست، روش BMA را برای میانگین مدل وزنی نشان می‌دهد (شکل ۲). همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، محدوده عدم قطعیت این رویکرد از ایجاد یک مدل همادی، با مشاهدات (علامت ضربدر) مطابقت دارد و دقت این روش نسبت به روش میانگین حسابی درخور توجه است. در روش BMA، مدل‌های کارتر، وزن‌های بیشتری دارند. به عبارت دیگر، در این روش هنگام برآورد وزن مدل، اثر کارایی و استقلال هر مدل در نظر گرفته می‌شود.

BMA یک میانگین چند مدلی از وزن مدل‌های کارا ایجاد می‌کند. از این روش برای کاهش عدم قطعیت مدل‌ها و اعضای آن نیز استفاده می‌شود (هوئیتینگ و همکاران، ۱۹۹۹ و مسعود و همکاران، ۲۰۱۹). روش BMA با سایر روش‌های میانگین‌گیری تفاوت دارد؛ زیرا این روش با در نظر گرفتن تابع احتمال مشخص، وزن‌ها و عدم قطعیت‌های مربوط به هر مدل را برآورد می‌کند. به عبارت دیگر، BMA وزن هر یک از مدل‌ها را به دست می‌آورد و در نتیجه آن، یک مدل ترکیبی (همادی) تولید می‌کند (مسعود و همکاران، ۲۰۲۰). به جای گزینش یک مدل منفرد از بین تعدادی از مدل‌های منتخب، روش BMA روشی مطمئن برای جایگزینی یک مدل همادی است. در این تحقیق، مدل مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP بر اساس حساسیت اقلیمی برای تولید یک مدل همادی انتخاب شدند. این روش متناسب با مهارت و استقلال هر مدل، به وزندهی مدل‌های منتخب می‌پردازد (طرح کلی در شکل ۲ ارائه شده است). برای درکی بهتر از چگونگی کارایی مدل همادی وزنی (در این پژوهش، مدل ایجاد شده با روش BMA) در برابر میانگین همادی



شکل ۲. طرح کلی مقایسه میانگین همادی حسابی (EnsM) و مدل میانگین‌گیری بیزین (BMA) (برگرفته از مسعود و همکاران، ۲۰۲۰).

توابع bic.glm، bicreg، bic.surv و bic.glm معیار اطلاعات بیزین (BIC) برای احتمالات مدل پسین (posterior) و عدم قطعیت، که برای متغیر بارش باید در مدل گنجانده شود، محاسبه می‌شود. سپس استقلال ساختاری نه مدل گفته‌شده با استفاده از پنجره Occam's حفظ می‌شود. گفتنی است از آنجا که مدل‌های NEX-GDDP مقیاس‌گاهی شده هستند، مقادیر مربوط به BIC ها نزدیک به هم است و تفاوت بسیار کمی در انتخاب بین مدل‌های رقیب برای تولید همادی دارند. بر اساس مقادیر ارائه‌شده BIC، مدل MPI-ESM-LR کمترین وزن و مدل IPSL-CM5A-LR بیشترین وزن را در مدل همادی دارد.

۵-۲ روش‌های درستی‌سنجی داده‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP

برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب از مجموعه داده‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP از دو سنجه آماری میانگین اربیی خطا (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. سنجه MBE برای بررسی اختلاف بین میانگین مقادیر مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید) و مدل استفاده می‌شود و بیانگر انحراف از میانگین است. این مقدار می‌تواند مثبت یا منفی باشد که نشان‌دهنده برآورد کمتر یا بیشتر از میانگین داده‌ها است. ریشه میانگین مربعات خطا یکی از سنجه‌های آماری است که معمولاً از آن برای بررسی دقت پیش‌بینی یک مدل در برابر داده‌های مشاهداتی استفاده می‌شود (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰):

$$MBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \frac{\frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i))^2}}{n} \quad (3)$$

که $Z(X_i)$ و $z^*(X_i)$ به ترتیب، مقدار برآوردشده و مقدار

برای توضیح اینکه BMA چگونه وزن مدل را برآورد می‌کند، خروجی چند مدل برای یک متغیر خاص (در این تحقیق، بارش روزانه) را در نظر بگیرید (مدل‌های نه‌گانه موجود در جدول ۱). هدف این است که مدل‌های مختلف سنجش شوند به طوری که مدل همادی تولیدشده، پیش‌نگری دقیق‌تری از بارش را نسبت به هر یک از مدل‌های منفرد منتخب داشته باشد. بر اساس آنچه شرح داده شد، وزن مدل برآوردشده با استفاده از BMA به شرح زیر است:

$$W_{m,BMA} = [w(m_1), w(m_2), \dots, w(m_k)] \quad (1)$$

که $w(m_i, i = 1, 2, 3, \dots, k)$ نشان‌دهنده وزن بهینه مدل‌ها با استفاده از یک تابع احتمال است. دامنه تغییرات $w(m_i)$ بین صفر و یک است. وزن صفر برای مدل‌هایی است که هیچ ارجحیتی در تولید مدل همادی ندارند و وزن یک برای مدل‌هایی است که به طور کامل در تولید مدل همادی نهایی مشارکت دارند (مسعود و همکاران، ۲۰۲۰). مجموع وزن مدل $(\sum_{i=1}^k w(m_i))$ برابر با یک است. وزن BMA با استفاده از الگوریتم زنجیره مارکوف مونت کارلو (Markov chain Monte Carlo, MCMC) (وروگت، ۲۰۱۶) برآورد می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پیش‌نگری مبتنی بر روش BMA ماهرانه‌تر از روش میانگین حسابی است؛ زیرا این خروجی در اساس یک پیش‌نگری هوشمند است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷). در این مطالعه کلیه فرایندهای مربوط به تولید مدل NEX-GDDP-MME با بسته آماری BMA در زبان برنامه‌نویسی R برای داده‌های روزانه نه مدل مطابق با جدول ۱ برای دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و پیش‌نگری (۲۰۲۶-۲۱۰۰) با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 انجام شده است.

برای تولید NEX-GDDP-MME با استفاده از

کرده‌اند. RX1day بیشینه مقدار بارش یک‌روزه است (بیشترین بارش در یک روز در هر منطقه جغرافیایی همانند ایستگاه یا نقطه شبکه) و در مقابل، SDII از تقسیم مجموع کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارشی در سال (دست‌کم یک میلی‌متر) به‌دست‌می‌آید. کلیه محاسبات مربوط به شاخص‌ها در بسته آماری RclimDex انجام شده است که از وبگاه <https://github.com/ECCC-CDAS/RclimDex> می‌توان دریافت کرد.

۳ نتایج و بحث

۳-۱-۳ درست‌سنجی بارش داده‌های مقیاس‌کاهی- شده NEX-GDDP طی دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰)

داده‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP به‌دلیل تفکیک افقی بالا، کارایی مدل‌های گردش کلی جو (GCM) را در شبیه‌سازی الگوهای فضایی بارش به میزان چشمگیری بهبود بخشیده‌اند و می‌توانند اطلاعات زیادی در مقیاس‌های کوچک‌تر، به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده ارائه دهند (شکل ۳). برونداد چند مدلی (MME) حاصل از مدل‌های CMIP5 حاضر در پروژه NEX-GDDP - با وجود کم‌برآورد کردن بارش - الگوهای اقلیمی آن را در ایران به‌خوبی بازتولید می‌کند.

ارایی مدل‌های نُه‌گانه منفرد در شبیه‌سازی بارش سالانه در ایران بر اساس برونداد مدل‌های CMIP5 مقیاس‌کاهی شده در پروژه NEX-GDDP در شکل ۳ نشان داده شده است. در این شکل رنگ‌های «سردتر» نشان‌دهنده کم‌برآوردی و رنگ‌های «گرم‌تر» نشان‌دهنده بیش‌برآوردی مدل‌ها است. بررسی اریبی داده‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP در ۴۹ ایستگاه منتخب برای بارش سالانه که بر اساس عرض جغرافیایی در شکل ۳ مرتب شده‌اند، نشان می‌دهد این مدل‌ها به غیر از سواحل شمالی ایران و همچنین برخی از ایستگاه‌ها همچون بوشهر

مشاهداتی متغیر در X_i هستند. n تعداد نقاط شبکه با مقدار مشاهداتی است.

۲-۶ جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC)

طبق شیوه‌نامه سازمان هواشناسی جهانی، یکی دیگر از روش‌های درست‌سنجی، استفاده از جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC) است. با استفاده از این روش می‌توان نمایه‌های پیش‌بینی/نگری صحیح و نادرست را برای هر طبقه از پیش‌بینی/نگری‌ها محاسبه کرد. مساحت زیر خم (AUC) این جدول به منزله یکی از نمایه‌های ارزیابی پیش‌بینی/نگری است که هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، به معنی کارایی بهتر پیش‌بینی‌ها است. در این روش اگر AUC کوچک‌تر از ۰/۵ باشد، آنگاه پیش‌بینی/نگری مدل پذیرفتنی نیست و اگر AUC بزرگ‌تر از ۰/۵ باشد، پیش‌بینی/نگری مدل پذیرفتنی است (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۵). از این روش برای مقایسه کارایی مدل همادی تولیدشده با روش BMA و مدل‌های منفرد CMIP5 مقیاس‌کاهی شده پروژه NEX-GDDP استفاده شد. برای کاهش حجم مقاله، تنها مساحت زیر خم جدول ROC یا همان AUC برای متوسط پهنه‌ای کل کشور ارائه شد.

۲-۷ شدت بارش روزانه و بیشینه بارش یک‌روزه (RX1day and SDII)

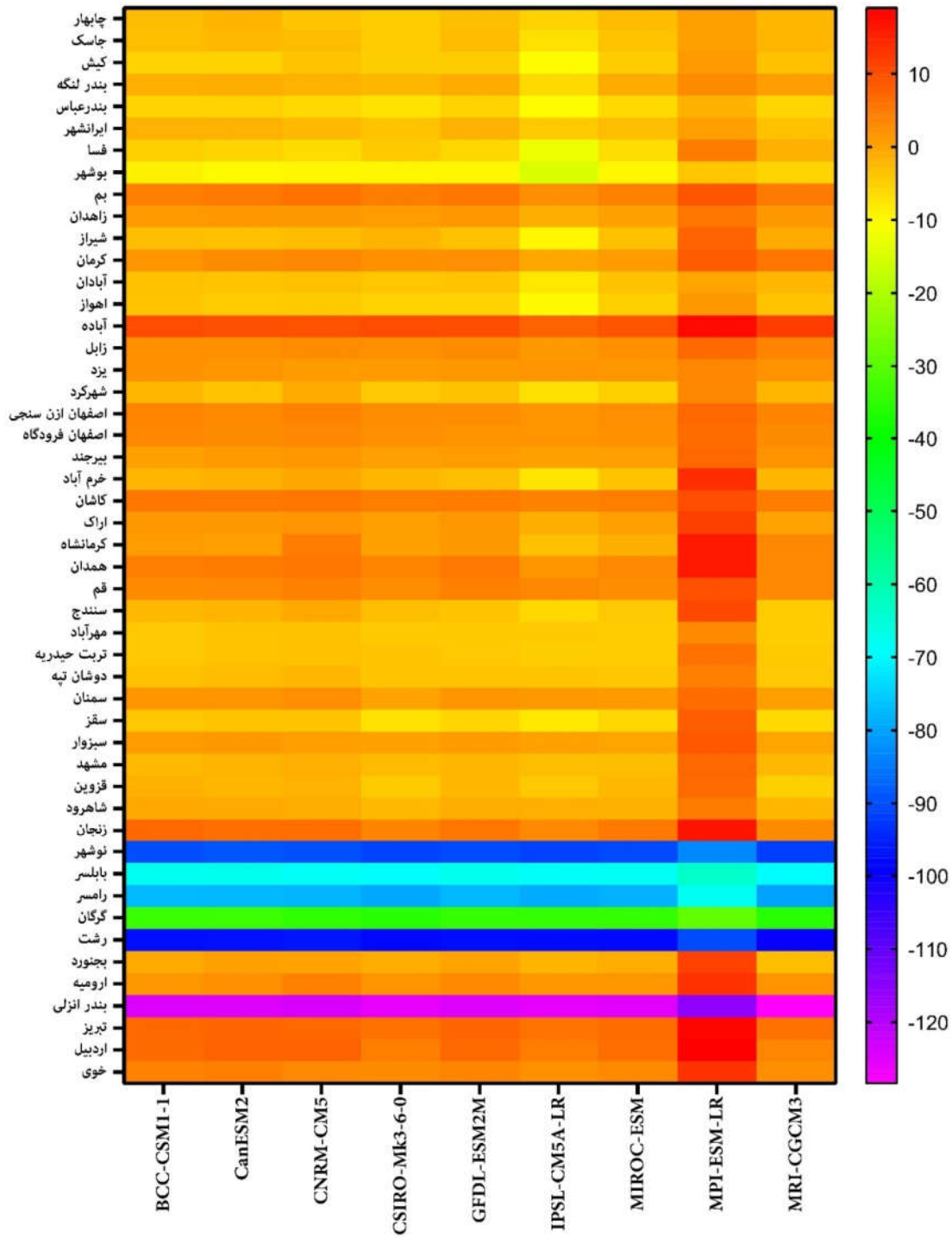
در این پژوهش جهت بررسی شدت بارش روزانه از دو شاخص استاندارد RX1day و SDII استفاده شد. این دو شاخص را کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI) ارائه کرده است. این دو شاخص را به‌طور مشترک، کمیسیون اقلیم‌شناسی (CCI) و برنامه جهانی نظارت بر داده‌های اقلیمی (WCDMP) سازمان هواشناسی جهانی، برنامه تغییرپذیری و پیش‌بینی اقلیم (CLIVAR)، برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) و کمیسیون مشترک WMO-IOC برای اقیانوس‌شناسی و هواشناسی دریایی (JCOMM) ارائه

به نظر می‌رسد این داده‌ها در فلات شرقی و مناطق داخلی ایران از کارایی بیشتری نسبت به سایر مناطق کشور برخوردار هستند (شکل ۴).

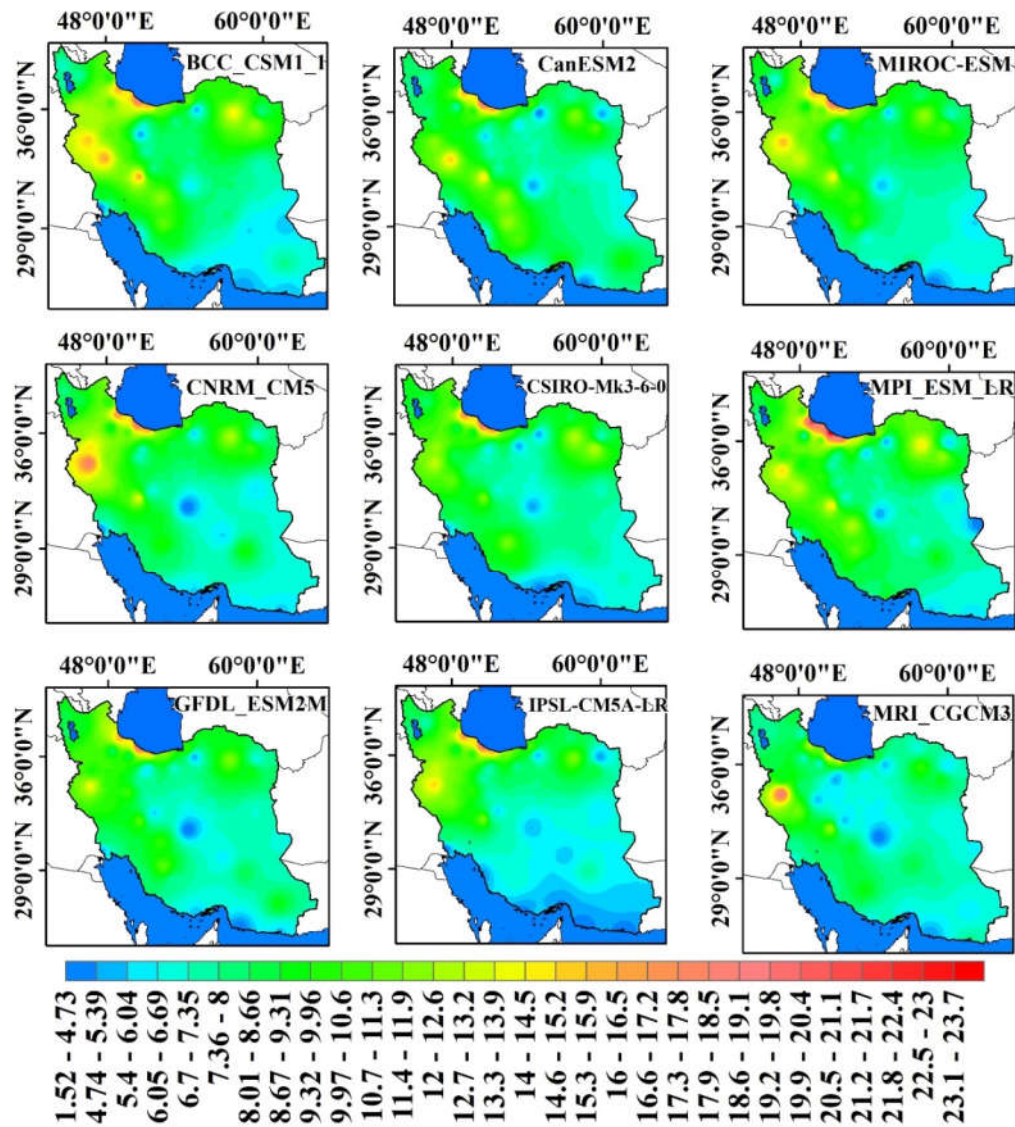
سنجه آماری دیگری که برای بررسی کارایی داده‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP بررسی شده است، سنجه ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) است. بر اساس نتایج، مقدار RMSE بارش سالانه در ایران بین ۱/۵۲ و ۲۳/۷ میلی‌متر است (شکل ۴). مقدار خطای بارش در مناطقی با توپوگرافی پیچیده (پهنه‌های خزری و زاگرس) به شدت زیاد است. همچنین در پهنه‌های خزری به دلیل اثر توپوگرافی و تقابل دریا-خشکی مقدار اریبی و خطا به نسبت سایر مناطق ایران بسیار زیاد است. باید در نظر داشت که رشته‌کوه‌ها در بیشتر مواقع شدت بارش‌های محلی را تشدید می‌کنند. در مجموعه داده‌های NEX-GDDP اثر توپوگرافی (بائو و ون، ۲۰۱۷) گنجانده شده است، اما مدل‌های به‌کاررفته در این پروژه در مناطق نامبرده کماکان خطای زیادی دارند که بر این اساس در تحلیل نتایج این مناطق باید احتیاط بیشتری داشت. شایان ذکر است یکی از علت‌های مهم خطا در مناطق مرتفع، نبود داده‌های مشاهداتی کافی (ایستگاه‌های هواشناسی) به‌عنوان شرایط مرزی ورودی این مدل‌ها است. از بین مدل‌های بررسی‌شده در پروژه NEX-GDDP، مدل MRI-CGCM3 بهترین کارایی را برای مناطق شمالی ایران ارائه داده است. کمینه خطا نیز در سواحل جنوبی و مناطق شرقی و جنوب شرقی ایران با مقدار RMSE کمتر از ۵ میلی‌متر محاسبه شده است. لذا داده‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP برای بارش سالانه در مناطق خشک ایران دقت بیشتری نسبت به مناطق پربارش شمالی کشور دارند.

در سواحل جنوبی ایران، کم‌برآوردی دارند. اریبی بارش سالانه بر اساس مدل‌های نُه‌گانه CMIP5 پروژه NEX-GDDP در ایران بین ۲۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر است. بر اساس نتایج، مدل‌های مقیاس‌گاهی شده NEX-GDDP در سواحل خزری ایران کم‌برآوردی (اریبی منفی) چشمگیری را نشان می‌دهند به‌طوری‌که بیشینه اریبی منفی با مقدار درخور توجه ۱۳۰ میلی‌متر در بندر انزلی دیده می‌شود. از بین مدل‌های نُه‌گانه بررسی‌شده، مدل IPSL-CM5A-LR بیشینه کم‌برآوردی را در بین ۴۹ ایستگاه داشته است. مدل MPI-ESM-LR با وجود آنکه بیش‌برآوردی جزئی را در تمامی ایستگاه‌ها داشته است، کماکان کاراترین مدل به‌شمار می‌آید. مقدار اریبی زیاد بارش در مناطق شمالی کشور ممکن است با توپوگرافی پیچیده، تقابل دریا-خشکی و همچنین تنوع زیاد پوشش سطح زمین در مقیاس مکانی کوچک در این مناطق در ارتباط باشد. در همین راستا مطالعات پیشین نیز که بر اساس مدل‌های CMIP5 انجام شدند، نشان دادند کارایی GCM‌ها به پارامترهای گوناگونی همچون توپوگرافی، عرض جغرافیایی، نوع پوشش منطقه و دوری/نزدیکی به منابع رطوبتی بستگی دارد (پاتاک و همکاران، ۲۰۱۹).

با توجه به تأثیر توپوگرافی بر بارش، برای مقایسه بهتر است ایران به مناطق مختلفی از نظر جغرافیایی تقسیم شود. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان ایران را به پهنه‌های خزری، رشته‌کوه البرز، شمال غرب، فلات شرقی، زاگرس میانی، زاگرس مرتفع، کویرهای داخلی و سواحل جنوبی تقسیم کرد. شایان ذکر است این مناطق تنها بر اساس توپوگرافی و برای تحلیل بهتر تقسیم‌بندی شده‌اند. نتیجه این بررسی نشان داد مجموعه داده‌های NEX-GDDP کارایی پذیرفتنی در شبیه‌سازی بارش برای بیشتر مناطق نامبرده به غیر از سواحل خزری دارند. علاوه بر این،



شکل ۳. میانگین اربیی خطای (MBE) بارش سالانه مدل‌های نُه‌گانه پروژه NEX-GDDP در ایستگاه‌های منتخب (برحسب میلی‌متر).



شکل ۴. ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) بارش سالانه در مدل‌های نُه‌گانه بررسی‌شده در پروژه NEX-GDDP.

محاسبه و در جدول ۲ ارائه شد. همان‌طور که در بخش روش کار نیز گفته شد، اگر امتیاز مهارتی کمتر از ۰/۵ باشد، نتایج مدل پذیرفتنی نیست و هرچه امتیاز مهارتی نزدیک عدد ۱ باشد، مدل کارایی مناسب‌تری دارد (قهرمان و همکاران، ۱۳۹۵). مطابق جدول ۲، بیشترین مقدار AUC برای بارش ایران با مدل MPI-ESM-LR برابر ۰/۸۳ و خطای استاندارد ۰/۰۳۰ برآورد شده است.

همان‌طور که گفته شد، یکی دیگر از روش‌های استفاده‌شده برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب منفرد و مدل همادی ایجادشده در این پژوهش با روش BMA، روش جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC) است. برای مقدار متوسط بارش در کل کشور برای هر یک از مدل‌های بررسی‌شده، جدول‌های توافقی امتیاز مهارتی تهیه و AUC و خطای استاندارد به همراه سطح معنی‌داری

BMA در مقایسه با مدل‌های منفرد بهبود چشمگیری یافته است (مقدار AUC برابر با ۰/۸۷ و خطای استاندارد نیز ۰/۰۲ است)؛ لذا در ادامه، کلیه تحلیل‌های مربوط به شدت بارش در ایران بر اساس چند مدلی همادی تولید شده (NEX-GDDP-MME) انجام خواهد شد.

پس از مدل MPI-ESM-LR، مدل‌های MRI-CGCM3 و MIROC-ESM با مقدار AUC برابر با ۰/۸۰ و خطای استاندارد ۰/۰۳ بیشترین کارایی را برای بارش سالانه پهنه‌ای ایران نشان دادند. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می‌شود، چند مدلی همادی (MME) تولیدشده با روش

جدول ۲. مساحت زیر خم ROC برای بارش سالانه داده‌های مقیاس‌کاهی شده NEX-GDDP و مدل همادی تولیدشده با روش BMA در متوسط پهنه‌ای ایران.

نام مدل	AUC	خطای استاندارد	P-Value
BCC-CSM1-1	۰/۷۴۹۸۱	۰/۰۴۹۸۶	<۰/۰۰۰۱
CanESM2	۰/۷۵۹۸۰	۰/۰۴۰۵۱	<۰/۰۰۰۱
CNRM-CM5	۰/۷۴۲۵	۰/۰۴۴۲۹	<۰/۰۰۰۱
CSIRO-Mk3-6-0	۰/۷۵۴۸۴	۰/۰۴۵۵۸	<۰/۰۰۰۱
GFDL-ESM2M	۰/۷۸۲۵۱	۰/۰۳۸۷۸	<۰/۰۰۰۱
IPSL-CM5A-LR	۰/۶۸۹۱۲	۰/۰۴۴۸۷	<۰/۰۰۰۱
MIROC-ESM	۰/۸۲۱۰۱	۰/۰۳۱۸۱	<۰/۰۰۰۱
MPI-ESM-LR	۰/۸۳۱۳۴	۰/۰۳۰۰۱	<۰/۰۰۰۱
MRI-CGCM3	۰/۸۲۵۴۷	۰/۰۳۲۳۵	<۰/۰۰۰۱
NEX-GDDP-MME	۰/۸۷۱۴۴	۰/۰۲۴۹۷	<۰/۰۰۰۱
مساحت زیر خم ROC: Area Under the Curve (AUC)؛ چند مدلی همادی (MME) با روش BMA			

رسیده به این منطقه به دلیل آنکه مقدار درخور توجهی از بارش خود را در مناطق کوهستانی البرز و زاگرس از دست داده‌اند، رطوبت کافی را جهت رخداد بارش ندارند. مقدار شاخص SDII نیز از الگوی تقریباً مشابه با RX1day در ایران پیروی می‌کند. با وجود مقدار زیاد بارش در سواحل خزری (پر بارش‌ترین منطقه ایران)، شدت بارش در این منطقه از ایران زیاد نیست. شدت بارش سالانه بر اساس برونداد NEX-GDDP-MME بین ۲/۷۳ میلی‌متر/روز در ایران مرکزی و ۷/۵۸ میلی‌متر/روز در سواحل خلیج فارس در تغییر است (شکل ۵). با توجه به نتایج دوره تاریخی، زاگرس مرتفع و سواحل جنوبی ایران بیشینه شدت بارش را نشان می‌دهند. این در حالیست که در بخش‌های بزرگی از ایران مرکزی، شمال شرق و شمال غرب، شدت بارش کمتر از ۵ میلی‌متر/روز است.

۲-۳ تغییرات شدت بارش در ایران طی دوره تاریخی با استفاده از رویکرد چند مدلی مقیاس‌کاهی شده روزانه NEX-GDDP با روش میانگین‌گیری بیزین (BMA)

شکل ۵ میانگین بلندمدت دوره تاریخی ۲۵ ساله (۲۰۰۵-۱۹۸۰) دو شاخص شدت بارش RX1day و SDII را بر اساس مدل همادی NEX-GDDP-MME نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، مقدار شاخص RX1day در ایران بین ۷/۴ میلی‌متر در ایران مرکزی و ۴۴/۹ میلی‌متر در زاگرس مرتفع در نوسان است. بیشینه تغییرات این شاخص در زاگرس مرتفع در جنوب غربی ایران و بوشهر در سواحل خلیج فارس است. اثر سدکنندگی زاگرس در غرب و البرز در شمال ایران باعث شده است که مناطق داخلی کشور در موقعیت سایه بارش قرار بگیرند و سامانه‌های

پیش‌نگری Rx1day در ایران را برای سه دوره آینده با توجه به دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) نشان می‌دهد. نتایج نشان از افزایش چشمگیر بیشینه بارش یک‌روزه در سراسر ایران دارد (به استثنای بخش‌های کوچکی از جنوب و جنوب شرق ایران). کمینه افزایش در آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) و بیشینه افزایش در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) با سناریوی بدبینانه (RCP8.5) اتفاق می‌افتد. البته باید در نظر داشت عدم قطعیت مدل‌های تغییر اقلیم با گذشت زمان افزایش می‌یابد. لذا آینده دور نسبت به آینده نزدیک و آینده میانی خطای به مراتب بیشتری دارد.

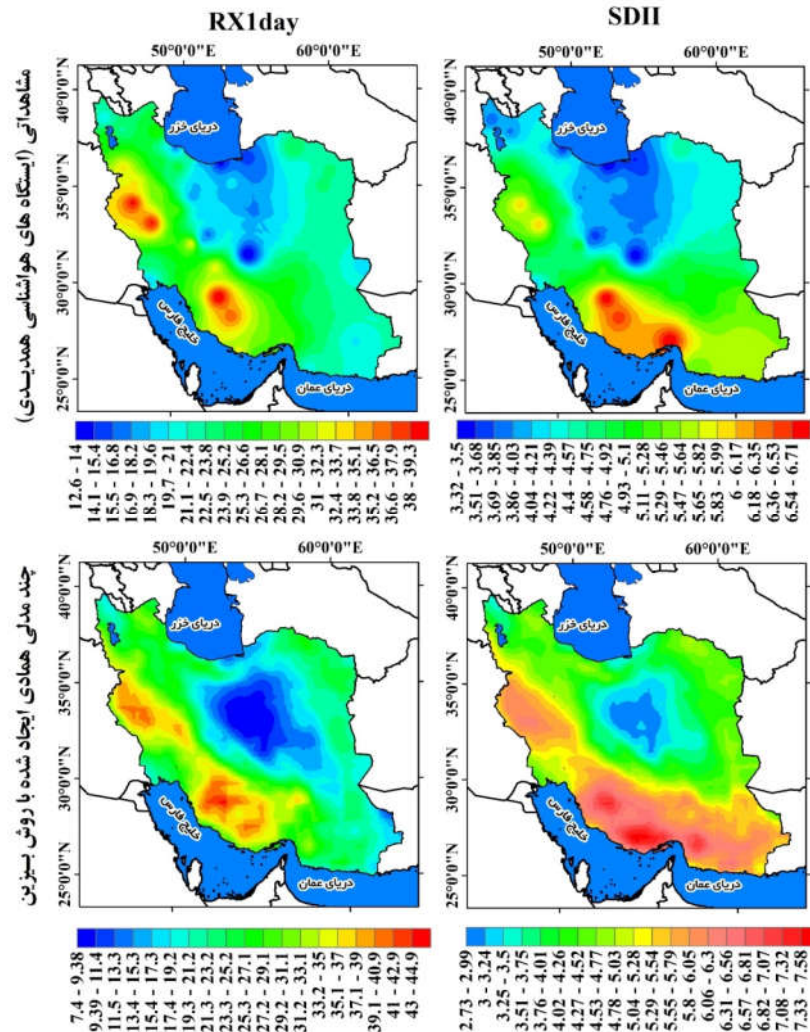
افزایش در Rx1day در پایان قرن بیست‌ویکم نشان‌دهنده افزایش شدت بارش در مقیاس‌های کوتاه‌تر تا پایان قرن است. به همین ترتیب، با توجه به افزایش شاخص Rx1day، احتمال رخداد سیلاب در ایران نیز افزایش می‌یابد. همچنین شاخص Rx1day در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) و اغلب در مناطق غربی و جنوب غربی ایران نسبت به آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶) افزایش بیشتری دارد. در مقابل، کمترین افزایش در Rx1day در مناطق داخلی و جنوب شرقی ایران با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 است. مشابه Rx1day پیش‌آگاهی‌های شاخص SDII (شکل ۷)، حاکی از آن است که بیشترین افزایش در جنوب غربی، برخی از مناطق غربی و سواحل خلیج فارس در جنوب ایران خواهد بود، درحالی‌که کمترین افزایش، برعکس شاخص Rx1day، اغلب در شمال غرب ایران است. افزایش بیشینه بارش یک‌روزه و شدت بارش در ایران نشان‌دهنده بی‌نظم‌تر شدن شدت بارش در ایران طی دوره‌های آتی است. از نظر مکانی، بیشینه بی‌هنجاری منفی Rx1day در مناطق جنوبی و جنوب شرق ایران دیده می‌شود (شکل ۶).

به‌طور کلی برای هر سه دوره آینده و دو سناریوی بررسی شده، بیشینه بی‌هنجاری Rx1day در غرب ایران به

نتایج نشان داد مدل‌های مقیاس‌گامی شده پروژه NEX-GDDP با وجود کارایی مناسبی که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارند، در مناطق شمالی به‌ویژه سواحل خزری کارایی مناسبی ندارند به‌طوری‌که کم‌برآوردی درخور توجه بارش در سواحل خزری (شکل ۳)، باعث شده است که شدت بارش روزانه در سواحل خزری با مناطق داخلی ایران برابری کند. این موضوع سبب می‌شود برونداد بارش داده‌های مقیاس‌گامی شده NEX-GDDP در سواحل خزری جهت انجام پیش‌نگری‌های اقلیمی کارایی لازم را نداشته باشد؛ لذا استفاده از داده‌های مقیاس‌گامی شده NEX-GDDP حتی با رویکرد چند مدلی نیز در سواحل خزری ایران باید با احتیاط زیادی صورت پذیرد. این نتیجه با داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدیدی) نیز تأیید شده است به‌گونه‌ای که کمینه Rx1day بر اساس داده‌های مشاهداتی ۱۲/۶ و بیشینه آن ۳۹/۳ میلی‌متر است. همچنین بیشینه و کمینه به‌دست‌آمده برای شاخص SDII نیز ۳/۳۲ و ۶/۷۱ میلی‌متر/روز است. مقایسه داده‌های مشاهداتی با داده‌های برونداد چند مدلی NEX-GDDP مؤید کارایی زیاد مدل در برآورد شدت بارش در ایران است. اختلاف بین مقادیر بیشینه و کمینه مدل و داده‌های ایستگاهی برای شدت بارش در ایران، ناشی از نبود ایستگاه در مناطق خشک و کویرهای داخلی از یک سو و مناطق مرتفع کوهستانی از سوی دیگر است (شکل ۵).

۳-۳ پیش‌نگری بیشینه بارش یک‌روزه و شدت بارش در ایران با استفاده از رویکرد چند مدلی مقیاس‌گامی‌شده روزانه NEX-GDDP با روش میانگین‌گیری بیزین (BMA)

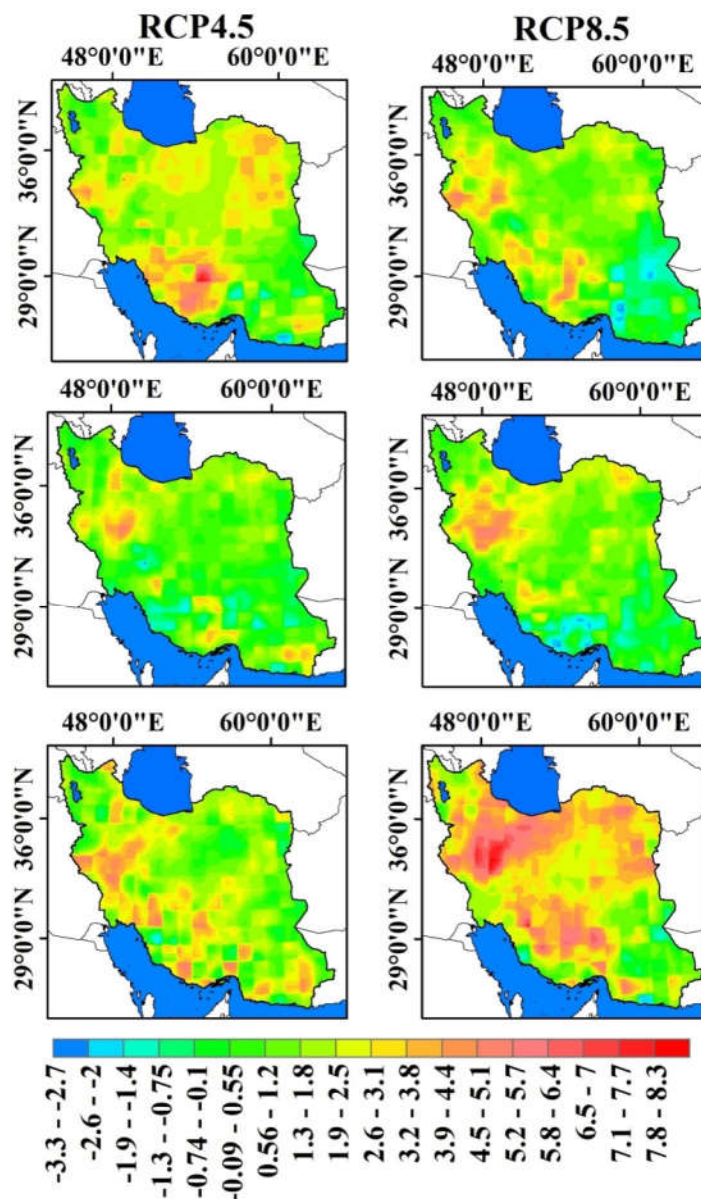
در این بخش، تغییرات بلندمدت دو شاخص Rx1day و SDII در آینده با استفاده از مدل همادی حاصل از نه مدل پروژه NEX-GDDP بررسی می‌شود. شکل ۶ بی‌هنجاری



شکل ۵. توزیع فضایی سالانه شدت بارش در ایران طی دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) مبتنی بر برون‌داد مدل همادی NEX-GDDP-MME (ردیف پایین) و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی هم‌مدیدی (ردیف بالا) برای بیشینه بارش یک‌روزه (RX1day) برحسب میلی‌متر و شاخص شدت بارش روزانه (SDII) برحسب میلی‌متر/روز.

درصد خواهد داشت (شکل ۶). نتایج سناریوی بدینانه (RCP8.5) نیز افزایش شدت بارش را برای متوسط پهنه کل کشور در هر دو دوره آینده نزدیک و میانی به ترتیب با مقادیر ۴/۷۶ و ۷/۸۸ درصد نشان می‌دهد. بیشینه افزایش شاخص RX1day برای دوره آینده دور با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲۵/۱۶ و ۴۰/۷۶ درصد در غرب ایران خواهد بود.

همراه بخش‌هایی از ایران مرکزی و سواحل خلیج فارس مشاهده می‌شود. در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) در مقایسه با دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، میانگین منطقه‌ای RX1day در ایران، به میزان ۷/۲۸ درصد با سناریوی RCP4.5 و ۱۳ درصد با سناریوی RCP8.5 افزایش می‌یابد. همچنین بیشینه بارش یک‌روزه با سناریوی RCP4.5 در آینده نزدیک و میانی، افزایشی در حدود ۴



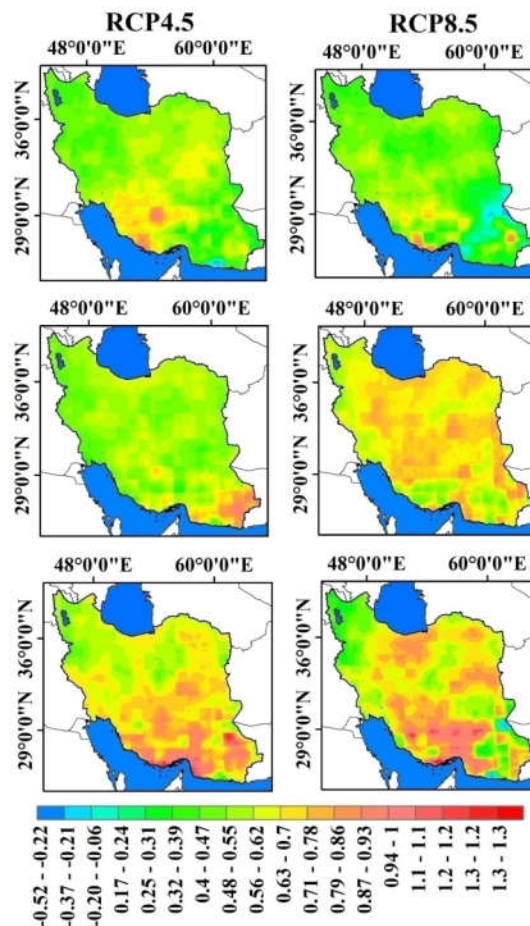
شکل ۶. پی‌هنجاری شاخص بیشینه بارش یک‌روزه (RX1day) در ایران مبتنی بر برورداد مدل همادی NEX-GDDP-MME بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP) طی دوره آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور برحسب میلی‌متر. (ردیف اول: آینده نزدیک؛ ردیف دوم: آینده میانی و ردیف سوم: آینده دور)

در جنوب شرق، کاهش و حداکثر $1/3$ میلی‌متر در روز در سواحل خلیج فارس افزایش خواهد داشت. بیشینه شدت افزایش بارش در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) با سناریوی بدبینانه RCP8.5 است. بر اساس نتایج، شدت بارش در آینده در بیش از ۶۰ درصد از مساحت کشور بیش از یک

شکل ۷ تغییرات پیش‌نگری شاخص SDII را با دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 برای آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) نشان می‌دهد. شدت بارش روزانه در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم، حداقل $0/52$ میلی‌متر در روز

کشور نشان می‌دهد شاخص شدت بارش نیز همانند پیشینه بارش یک‌روزه در دهه‌های آینده افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج سناریوی حد واسطه (RCP4.5)، شدت بارش در آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور به ترتیب به میزان ۴/۴۵، ۴/۸۱ و ۷/۲۱ درصد افزایش خواهد داشت. به همین ترتیب طبق نتایج سناریوی بدبینانه (RCP8.5)، شدت بارش در آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور به ترتیب ۴/۷۶، ۸/۲۹ و ۱۳/۹۶ درصد برای متوسط پهنه‌ای کل ایران افزایش خواهد داشت. پیشینه شدت بارش نیز در ایران با سناریوی بدبینانه RCP8.5 در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) به مقدار ۲۶/۷۳ درصد دیده می‌شود (شکل ۷). همان‌طور که در شکل نیز نشان داده شده است

میلی‌متر افزایش خواهد داشت. احتمال می‌رود با افزایش شدت بارش در شرایط تغییر اقلیم، سیلاب‌هایی با فراوانی بیشتر در این مناطق رخ دهد. در مقابل، پیش‌نگری شاخص SDII نشان داد برخی از مناطق جنوب شرقی و جنوب ایران بی‌هنجاری منفی را تجربه خواهند کرد. مقدار بی‌هنجاری برای دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) بیشتر است. شاید علت این موضوع، کاهش فعالیت مونسون تابستانه آسیایی (ASM) در پایان قرن حاضر باشد (تاکاهاشی و همکاران، ۲۰۲۰). ترنز و آنامالایی (۲۰۱۲) کاهش فعالیت مونسون در سال‌های اخیر را گزارش کرده‌اند. بررسی نقشه‌های پیش‌نگری شاخص SDII برای متوسط



شکل ۷. بی‌هنجاری شاخص شدت بارش روزانه (SDII) در ایران مبتنی بر برونداد مدل همادی NEX-GDDP-MME بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP) طی دوره آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور برحسب میلی‌متر در روز (ردیف اول: آینده نزدیک؛ ردیف دوم: آینده میانی و ردیف سوم: آینده دور).

مطالعاتی با مقیاس منطقه‌ای و محلی استفاده شود. نتایج نشان داد بیشتر مدل‌های CMIP5 مقیاس‌کاهی شده در پروژه NEX-GDDP می‌توانند الگوی فضایی بارش سالانه را در ایران به خوبی شبیه‌سازی کنند.

توپوگرافی، یکی از واداشتهای اقلیمی منطقه‌ای است که به‌طور خاص در کشور ایران، اثر انکارنشدنی در پراکندگی فضایی بارش دارد. داده‌های مقیاس‌کاهی شده پروژه NEX-GDDP عامل توپوگرافی را در نظر گرفته‌اند و از این رو به بهبود برآورد بارش نسبت به به‌کارگیری برونداد مستقیم مدل‌های GCM منجر شده‌اند (معصوم پورسماکوش و همکاران، ۱۳۹۶ و احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). این پیشرفت در به‌تصویر کشیدن الگوی فضایی بارش‌های فرین در کشور، ناشی از به‌کارگیری الگوریتم BCSD در این مدل‌ها است. با این حال، باید توجه داشت که داده‌های مقیاس‌کاهی شده پروژه NEX-GDDP در شبیه‌سازی الگوهای بارشی و شدت بارش در مناطق پربارش ایران همچون سواحل خزری و زاگرس مرتفع کم‌برآورد هستند و نتایج ارائه شده برای شدت بارش به‌ویژه در سواحل خزری، خطای زیادی نسبت به مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارد.

نتایج مدل همادی برای دوره‌های آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۶، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۷۵) به‌طور کلی افزایش شدت بارش را در قرن بیست و یکم با سناریوهای واداشت تابشی (RCP) برای ایران نشان می‌دهد. افزایش شدت بارش در ایران با نتایج مطالعات پیشین در مناطق مختلف کره زمین با استفاده از مدل‌های CMIP3 (وانگ و همکاران، ۲۰۱۲) و CMIP5 (ژو و همکاران، ۲۰۱۹) همخوانی دارد. علاوه بر این، شدت بارش در ایران بیشینه بی‌هنجاری مثبت را با سناریوی بدبینانه (RCP8.5) نشان می‌دهد. طبق برجسته‌ترین نتیجه این تحقیق، انتظار می‌رود شدت بارش طی دهه‌های آتی در ایران افزایش پیدا کند و این افزایش برای مناطق غربی، جنوب غربی و سواحل خلیج فارس

و از درصد تغییرات SDII برای متوسط پهنه کشور نیز بر می‌آید، شدت بارش تا پایان قرن حاضر در ایران افزایشی است. برونداد مدل همادی NEX-GDDP-MME افزایش به نسبت بیشتری را در قسمت‌های جنوبی ایران نسبت به دوره تاریخی نشان می‌دهد.

پیش‌نگری شدت بارش NEX-GDDP-MME افزایش چشمگیری را در شاخص SDII در ایران نشان می‌دهد که یافته‌های قبلی در سطح جهانی را تأیید می‌کند (سونکوئه و همکاران، ۲۰۱۹). این مقدار از افزایش شدت بارش در ایران، با ظرفیت بیشتر هوای گرم‌تر برای نگه داشتن رطوبت در ارتباط است و به روشنی نقش رابطه کلاویوسوس - کلاپیرون (Clausius-Clapeyron) (اسکوکیماوو و همکاران، ۲۰۱۵) را در افزایش شدت بارش آینده ایران نشان می‌دهد.

۴ نتیجه‌گیری

تفکیک افقی بالای مجموعه داده‌های پروژه NEX-GDDP امکان بررسی تغییر اقلیم را در مقیاس‌های محلی تا منطقه‌ای، حتی در مقیاس فضایی حوضه‌های آبریز فراهم می‌آورد (تراشر و همکاران، ۲۰۱۳). در این پژوهش، پیش‌نگری شدت بارش با استفاده از مدل‌های CMIP5 مقیاس‌کاهی شده با پروژه NEX-GDDP برای ایران بررسی شد. هدف از این تحقیق بررسی کارایی برونداد بارش مجموعه داده‌های پروژه NEX-GDDP برای استفاده در برآورد و پیش‌نگری شدت بارش در ایران است. بررسی اولیه نتایج نشان داد مجموعه داده‌های اقلیمی مقیاس‌کاهی شده آماری NEX-GDDP با تفکیک افقی بالا، کارایی مدل‌های CMIP5 را در شبیه‌سازی شدت بارش‌های فرین در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده است. به‌طور کلی برونداد مستقیم مدل‌های CMIP5 به دلیل تفکیک افقی پایین و در نظر نگرفتن نقش واداشتهای منطقه‌ای نمی‌تواند در

بیش از سایر مناطق ایران است و می‌تواند به‌طور بالقوه خطر سیل را در این مناطق به میزان چشمگیری افزایش دهد.

پیش‌نگری شدت بارش در ایران بر اساس دو شاخص RX1day و SDII از مجموعه شاخص‌های فرین بارش کارگروه ETCCDI با مدل همادی NEX-GDDP-MME نشان داد با تداوم گرمایش جهانی، شدت بارش در سراسر ایران به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد. شاخص بیشینه بارش یک‌روزه (RX1day)، برای متوسط کشور تا پایان این قرن بین ۴/۴۲ تا ۱۳/۰۸ درصد نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) افزایش خواهد یافت. همچنین شاخص SDII نیز بین ۴/۴۵ و ۱۳/۹۶ درصد برای متوسط پهنه ایران افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش شدت بارش، بیشتر در منطقه ساحلی جنوب ایران به‌خصوص در سواحل خلیج فارس و غرب ایران اتفاق می‌افتد، درحالی‌که کمترین افزایش، بیشتر در منطقه شمال غرب دیده می‌شود.

GCM های مقیاس کاهی شده CMIP5 در پروژه NEX-GDDP برای شبیه‌سازی بارش و شاخص‌های فرین منتج از آن در ایران کارایی به‌نسبت خوبی دارند، اما هنوز هم عدم قطعیت (بیش/کم‌برآوردی) زیادی برای این مدل‌ها در برخی از مناطق ایران همچون شمال کشور وجود دارد. مقایسه کارایی برون‌داد مدل همادی با مدل‌های منفرد بر اساس روش جدول توافقی امتیاز مهارتی (ROC) نشان داد مدل همادی NEX-GDDP-MME که با روش BMA تولید شده است، پیشرفت زیادی را در برآورد بارش ایران نشان می‌دهد. باین‌حال باید توجه داشت روش‌های مقیاس کاهی آماری به‌تنهایی مزیت زیادی ندارند و در برخی از مناطق با تقابل زیاد دریا-خشکی، پوشش سطحی متنوع و مناطق کوهستانی خطای درخور توجهی دارند. این موضوع همراه با نبود ایستگاه‌های مشاهداتی کافی، که ورودی شرایط مرزی مدل‌های GCM هستند،

از دلایل اصلی خطای مدل‌ها در این منطقه‌اند؛ بنابراین در تحقیقات آینده باید به کاربست تعداد بیشتری از مدل‌ها با درنظرگرفتن حساسیت اقلیمی و استقلال ساختاری برای همادی کردن توجه ویژه شود. بر همین اساس، عدم قطعیت در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم آینده همواره چالشی جدی در بین پژوهشگران خواهد بود و برای کاهش آن باید به کاربست مدل‌های همادی چند مدلی (MME) و مقیاس کاهی‌های آماری و دینامیکی توجه شود. در نتیجه، مدل‌های پروژه NEX-GDDP پتانسیل زیادی را برای تبدیل شدن به یک مجموعه داده با عدم قطعیت کم در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم آینده در مقیاس‌های منطقه‌ای تا محلی و حتی حوضه‌های آبریز دارند.

منابع

- احمدی، ح.، فلاح قالمهری، غ.، باعقیده، م.، ۱۳۹۸، پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP): فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۱)، ۱۷۷-۱۹۶.
- احمدی، م.، داداشی رودباری، ع.، دیرمجان، آ.، ۱۳۹۹، برآورد رواناب با استفاده از مدل IHACRES بر اساس داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS و مدل‌های CMIP5 (مطالعه موردی: حوضه آبخیز گرگانرود- منطقه آق‌قلا): تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۳)، ۶۵۹-۶۷۱.
- زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون‌داد همادی مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6: فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.
- زیدعلی‌نژاد، ن.، ناصری، ح.، شکیبیا، ع.، علیجانی، ف.، ۱۳۹۸، شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه تراز-هرکش، استان خوزستان، با استفاده از مجموعه داده NEX-GDDP و مدل بارش-رواناب IHACRES:

- هواشناسی و علوم جو، ۲(۲)، ۱۶۲-۱۷۸.
- قهرمان، ن.، بابائیان، ا.، طباطبایی، م.، ۱۳۹۵، ارزیابی پس‌پردازش برون‌داده‌های دینامیکی مدل‌های اقلیمی در برآورد تغییرات تبخیر تعرق پتانسیل تحت سناریوهای واداشت تابشی (بررسی موردی: دشت مشهد): فیزیک زمین و فضا، ۴۰-۵۳.
- Akinsanola, A. A., Ongoma, V., and Kooperman, G. J., 2021, Evaluation of CMIP6 models in simulating the statistics of extreme precipitation over Eastern Africa: *Atmospheric Research*, **254**, 105509.
- Allan, R. P., and Soden, B. J., 2008, Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes: *Science*, **321**(5895), 1481-1484.
- Bao, Y., and Wen, X., 2017, Projection of China's near- and long-term climate in a new high-resolution daily downscaled dataset NEX-GDDP: *Journal of Meteorological Research*, **31**(1), 236-249.
- Chen, H. P., Sun, J. Q., and Li, H. X., 2017, Future changes in precipitation extremes over China using the NEX-GDDP high-resolution daily downscaled data-set: *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **10**(6), 403-410.
- Das, S., Das, J., and Umamahesh, N. V., 2021, Identification of future meteorological drought hotspots over Indian region: A study based on NEX-GDDP data: *International Journal of Climatology*, <https://doi.org/10.1002/joc.714>.
- Donat, M. G., Alexander, L. V., Herold, N., and Dittus, A. J., 2016, Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**(19), 11-174.
- Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., and Dadashi-Roudbari, A., 2019, Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran: *Theoretical and Applied Climatology*, **138**(3), 1539-1562.
- Feild, J., & Learned-Miller, E., 2012, Scene text recognition with bilateral regression: Department of Computer Science, University of Massachusetts Amherst, Tech. Rep. UM-CS-2012-021.
- Fowler, H. J., Ekström, M., Blenkinsop, S., & Smith, A. P., 2007, Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **112**(D18), 1-45.
- Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., and Volinsky, C. T., 1999, Bayesian model averaging: a tutorial (with comments by M. Clyde, David Draper and EI George, and a rejoinder by the authors: *Statistical science*, **14**(4), 382-417.
- IPCC 2013, *Climate change 2013: The physical science basis*, in Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P. M. (eds.), Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change: Cambridge University Press, Cambridge.
- Katiraie-Boroujerdy, P. S., Akbari Asanjan, A., Chavoshian, A., Hsu, K. L., and Sorooshian, S., 2019, Assessment of seven CMIP5 model precipitation extremes over Iran based on a satellite-based climate data set: *International Journal of Climatology*, **39**(8), 3505-3522.
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., and Wehner, M., 2013, Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble: *Climatic Change*, **119**(2), 345-357.
- Klutse, N. A. B., Quagraine, K. A., Nkrumah, F., Quagraine, K. T., Berkoh-Oforiwa, R., Dzrobi, J. F., and Sylla, M. B., 2021, The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations: *Earth Systems and Environment*, **5**(1), 25-41.
- Lange, S., 2020, ISIMIP3b bias adjustment fact sheet.
- Massoud, E. C., Espinoza, V., Guan, B., and Waliser, D. E., 2019, Global climate model ensemble approaches for future projections of atmospheric rivers: *Earth's Future*, **7**(10), 1136-1151.
- Massoud, E. C., Lee, H., Gibson, P. B., Loikith, P., and Waliser, D. E., 2020, Bayesian model averaging of climate model projections constrained by precipitation observations over the contiguous United States: *Journal of Hydrometeorology*, **21**(10), 2401-2418.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., et al., 2011, The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300: *Climatic Change*, **109**(1), 213-241.
- Pathak, R., Sahany, S., Mishra, S. K., and Dash, S. K., 2019, Precipitation biases in CMIP5 models over the South Asian Region: *Scientific Reports*, **9**(1), 1-13.

- Raghavan, S. V., Hur, J., and Liong, S. Y., 2018: Evaluations of NASA NEX-GDDP data over Southeast Asia: present and future climates: *Climatic Change*, **148**(4), 503-518.
- Rao, K. K., Kulkarni, A., Patwardhan, S., Kumar, B. V., and Kumar, T. L., 2020, Future changes in precipitation extremes during northeast monsoon over south peninsular India: Theoretical and Applied Climatology, **142**(1), 205-217.
- Sachindra, D. A., Ahmed, K., Rashid, M. M., Shahid, S., and Perera, B. J. C., 2018, Statistical downscaling of precipitation using machine learning techniques: *Atmospheric Research*, **212**, 240-258.
- Schmidli, J., Frei, C., and Vidale, P. L., 2006, Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods: *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, **26**(5), 679-689.
- Soccimarro, E., Villarini, G., Vichi, M., Zampieri, M., Fogli, P. G., Bellucci, A., and Gualdi, S., 2015, Projected changes in intense precipitation over Europe at the daily and subdaily time scales: *Journal of Climate*, **28**(15), 6193-6203.
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., and Reichstein, M., 2012, Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in Field, C. B., et al. (eds.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on climate change (IPCC)*: Cambridge University Press, 109-230.
- Sheffield, J., Goteti, G., and Wood, E. F., 2006, Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling: *Journal of Climate*, **19**(13), 3088-3111.
- Singh, V., Jain, S. K., and Singh, P. K., 2019, Inter-comparisons and applicability of CMIP5 GCMs, RCMs and statistically downscaled NEX-GDDP based precipitation in India: *Science of the Total Environment*, **697**, 134163.
- Sonkoué, D., Monkam, D., Fotso-Nguemo, T. C., Yepdo, Z. D., and Vondou, D. A., 2019, Evaluation and projected changes in daily rainfall characteristics over Central Africa based on a multi-model ensemble mean of CMIP5 simulations: *Theoretical and Applied Climatology*, **137**(3-4), 2167-2186.
- Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., and Alexander, L. V., 2021, A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation: *Journal of Climate*, **34**(1), 243-258.
- Takahashi, H. G., Kamizawa, N., Nasuno, T., Yamada, Y., Kodama, C., Sugimoto, S., and Satoh, M., 2020, Response of the Asian summer Monsoon precipitation to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model: *Journal of Climate*, **33**(18), 8147-8164.
- Tank, A. K., Zwiers, F. W., and Zhang, X., 2009, *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation: Climate Data and Monitoring*, WCDMP-No. 72, WMO-TD No. 1500.
- Thrasher, B., Maurer, E. P., McKellar, C., and Duffy, P. B., 2012, Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping: *Hydrology and Earth System Sciences*, **16**(9), 3309-3314.
- Thrasher, B., Xiong, J., Wang, W., Melton, F., Michaelis, A., and Nemani, R., 2013, Downscaled climate projections suitable for resource management: *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **94**(37), 321-323.
- Turner, A. G., and Annamalai, H., 2012, Climate change and the South Asian summer Monsoon: *Nature Climate Change*, **2**(8), 587-595.
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., and Abbaspour, K. C., 2019, The future of extreme climate in Iran: *Scientific Reports*, **9**(1), 1-11.
- Vrugt, J. A., 2016, Markov chain Monte Carlo simulation using the DREAM software package: Theory, concepts, and MATLAB implementation: *Environmental Modelling & Software*, **75**, 273-316.
- Wang, H. J., Sun, J. Q., Chen, H. P., Zhu, Y. L., Zhang, Y., Jiang, D. B., and Yang, S., 2012, Extreme climate in China: Facts, simulation and projection: *Meteorologische Zeitschrift*, **21**(3), 279-304.
- Wang, X., Yang, T., Li, X., Shi, P., and Zhou, X., 2017, Spatio-temporal changes of precipitation and temperature over the Pearl River basin based on CMIP5 multi-model ensemble: *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **31**(5), 1077-1089.
- Warnatzsch, E. A., and Reay, D. S., 2019, Temperature and precipitation change in Malawi: Evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning: *Science of the Total Environment*, **654**, 378-392.
- Westra, S., Alexander, L. V., and Zwiers, F. W., 2013, Global increasing trends in annual maximum daily precipitation: *Journal of Climate*,

- 26(11), 3904-3918.
- World Meteorological Organization, 2011, Weather Extremes in a Changing Climate: Hindsight on Foresight (World Meteorological Organization, Geneva), WMO publication no. 1075.
- Xu, K., Xu, B., Ju, J., Wu, C., Dai, H., and Hu, B. X., 2019, Projection and uncertainty of precipitation extremes in the CMIP5 multimodel ensembles over nine major basins in China: Atmospheric Research, **226**, 122-137.
- Zarrin, A., and Dadashi-Roudbari, A., 2021, Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble: Theoretical and Applied Climatology, **144**(1), 643-660.
- Zeydalinejad, N., Nassery, H., Shakiba, A., and Alijani, F., 2021, The evaluations of NEX-GDDP and Marksim downscaled data sets over Lali region, Southwest Iran: Journal of the Earth and Space Physics, **46**(4), 213-230.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., and Zwiers, F. W., 2011, Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data: Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, **2**(6), 851-870.
- Zhao, C., Gong, J., Wang, H., Wei, S., Song, Q., and Zhou, Y., 2020, Changes of temperature and precipitation extremes in a typical arid and semiarid zone: Observations and multi-model ensemble projections: International Journal of Climatology, **40**(12), 5128-5153.
- Zhou, T., and Chen, X., 2015, Uncertainty in the 2 C warming threshold related to climate sensitivity and climate feedback: Journal of Meteorological Research, **29**(6), 884-895.

Projection of precipitation intensity in Iran using NEX-GDDP by multi-model ensemble approach

Azar Zarrin^{1*} and Abbasali Dadashi-Roudbari²

¹Associate Professor of Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Department of Geography, Mashhad, Iran
²Postdoctoral Researcher of Climatology, Ferdowsi University of Mashhad, Department of Geography, Mashhad, Iran

(Received: 18 August 2021, Accepted: 19 October 2021)

Summary

Global warming has a significant impact on weather and climate change. These changes, and especially changes in climate extremes, have a great impact on human society and ecosystems. Future changes in extreme climate events, including precipitation extreme, will cause great damage to society, the economy, and ecosystems because of their potentially severe effects. The purpose of this study is to investigate the performance of NASA earth exchange global daily downscaled projections (NEX-GDDP) in simulating precipitation and its long-term projection in Iran.

For this purpose, the nine models of NEX-GDDP were selected based on climate sensitivity. Precipitations from 49 ground stations during the historical period (1980-2005) were used to evaluate the precipitation output of the mentioned models using RMSE and MBE statistics. The Bayesian model averaging (BMA) method was used to generate an ensemble model from nine models. Intensity of precipitation with two indices SDII and RX1day is projected during the three periods of near future (2026-2050), medium future (2051-2075) and far future (2076-2100) under two scenarios RCP4.5 and RCP8.5.

The results showed that NEX-GDDP models did not have much bias compared to observation and most models with low relative error have good performance in reproducing the spatial pattern of precipitation in Iran. Among the nine selected models, MPI-ESM-LR model has shown the maximum overestimation and IPSL-CM5A-LR model has shown the maximum underestimation in Iran. Compared to other GCMs in the historical period, NEX-GDDP models show less uncertainty at the regional scale; therefore, NEX-GDDP simulations are much more reliable. The precipitation intensity projections show that in the future, precipitation will occur more intensively throughout Iran. The RX1day and SDII indices will increase by about 4 to 13 percent for the average area of Iran by the end of the century, which indicates an increase in flooding in Iran in the coming decades.

Projections of precipitation intensity in Iran based on two indices RX1day and SDII from the set of precipitation index of ETCCDI working group by ensemble model NEX-GDDP-MME showed that with the continuation of global warming, precipitation intensity will increase significantly throughout Iran. The maximum one-day precipitation amount (RX1day) will increase between 4.42 to 13.08 percent for the area-averaged by the end of this century compared to 1980-2005. Moreover, the SDII index will increase between 4.45 to 13.96% for area-average of Iran. The highest increase in precipitation intensity generally occurs in the coastal region of southern Iran, especially in the coasts of the Persian Gulf and western Iran, while the lowest increase is generally observed in the northwestern region.

Keywords: Precipitation intensity, climate change, BMA method, NEX-GDDP, Iran

*Corresponding author:

zarrin@um.ac.ir